

MÉTODO PARA LA ESTIMACIÓN EXPERIMENTAL DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE ALGUNOS MATERIALES COMUNES EN COLOMBIA PARA APLICACIONES HVAC/R.

Methodology for experimental estimation of thermal conductivity, for some common materials in Colombia to HVAC/R applications

RESUMEN

Este artículo presenta el desarrollo experimental implementado para estimar la conductividad térmica de algunos materiales utilizados en Colombia en el campo de la refrigeración y el acondicionamiento de aire (HVAC/R). Se utiliza como herramienta el balance térmico sobre un calorímetro especialmente diseñado e instrumentado para estimar la conductividad de diferentes materiales, minimizando el efecto sobre el balance térmico del ambiente. El modelo matemático implementado a partir del balance térmico se resuelve mediante el software EES.

PALABRAS CLAVES: Conductividad térmica, análisis experimental, calorímetro, sistemas HVAC/R

ABSTRACT

This article presents the experimental development implemented to estimate the thermal conductivity of some materials used in Colombia at the field of refrigeration and air conditioning (HVAC/R). The thermal balance is used as a tool on a calorimeter, specially designed and instrumented to estimate the conductivity of different materials, diminishing the ambient effect on the thermal balance. The mathematical model implemented from the thermal balance is solved using EES software.

KEYWORDS: Thermal conductivity, experimental analysis, calorimeter. HVAC/R systems.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el creciente costo de energía y la dependencia de provisión foránea de petróleo exigen diseñar e implementar métodos de aislamiento térmico, que permitan reducir el consumo de energía especialmente en aplicaciones HVAC/R. Debido a lo anterior, se ha hecho evidente la importancia del ahorro energético y la reducción en la emisión de contaminantes; Diferentes normativas y regulaciones cada vez mas exigentes, se han estado implementando, en los que la calidad y características de los materiales aislantes tienen un papel significativo. Actualmente, gracias a los adelantos en la ciencia de los materiales y la industria química, los aislantes térmicos han reducido su capacidad de respuesta para conducir el calor, es decir, han sido caracterizados por un bajo coeficiente de conductividad térmica, lo que implica una reducción en la demanda energética generada por algún proceso en particular.

En Colombia, se fabrican un alto porcentaje de los productos aislantes térmicos utilizados en la industria de

la construcción e instalaciones frigoríficas, sin embargo existe muy poca información sobre sus propiedades térmicas. En muchos casos se suponen similares a la de los materiales fabricados en países desarrollados sin considerar las variantes existentes en las materias primas y procesos de fabricación. En este artículo se presenta el desarrollo experimental implementado para estimar de manera simple a nivel de docencia, la conductividad térmica de algunos materiales utilizados en Colombia y los resultados experimentales encontrados. Se presenta adicionalmente el análisis de incertidumbre implementado para determinar el grado de confianza que presentan estos resultados.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE MEDICIÓN.

El método de ensayo consiste básicamente en estimar la conductividad térmica mediante el balance térmico sobre un calorímetro, diseñado e instrumentado para reducir el efecto del ambiente exterior sobre los resultados. En la

NÉSTOR FONSECA DIAZ

Ingeniero Mecánico, M.Sc.
Profesor Auxiliar
Universidad Tecnológica de Pereira
nfonseca@utp.edu.co

JUAN ESTEBAN TIBAQUIRÁ

Ingeniero Mecánico, M.Sc.
Profesor Asistente
Universidad Tecnológica de Pereira

figura 1 se muestra el esquema del calorímetro propuesto para los ensayos.

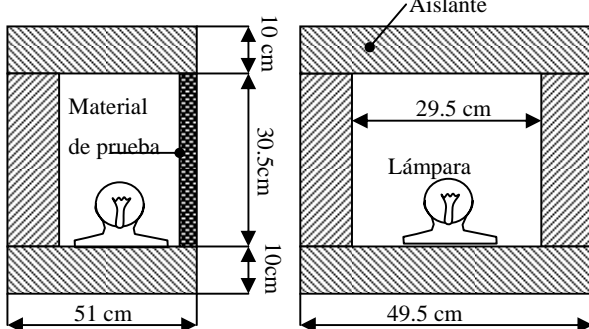


Figura 1. Vista en corte lateral y frontal del calorímetro.

El calorímetro está compuesto por 5 paneles de poliuretano expandido de 10 cm de espesor y conductividad térmica de 0,02 W/mK, blindados en lámina de aluminio de baja emisividad. El material de prueba se instala en la cara faltante para cerrar el calorímetro al ambiente exterior.

En el interior del calorímetro se instala como fuente calorífica una lámpara de 60 W conectada a un circuito eléctrico de alimentación que permite la regulación de la potencia de alimentación y su medición, con el fin de controlar la temperatura máxima del aire dentro del calorímetro y evitar de esta forma el deterioro de los materiales por un eventual sobrecalentamiento.

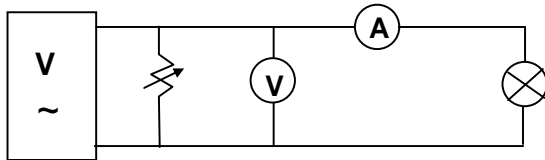


Figura 2. Esquema eléctrico de alimentación del calorímetro.

En las figuras 3 y 4 se observa el calorímetro, instalación eléctrica e instrumentación implementados.

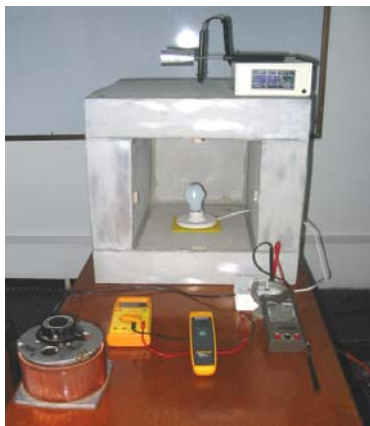


Figura 3. Imágenes del calorímetro, sistema eléctrico e instrumentación.



Figura 4. Imágenes del calorímetro y material en prueba.

3. BALANCE TERMICO DEL CALORIMETRO.

Se considera como volumen de control el calorímetro y como frontera las superficies exteriores de las seis barreras que lo componen. Se puede suponer para el balance térmico del calorímetro, que toda la potencia eléctrica disipada por la lámpara en su interior se disipa por las seis superficies que lo componen en forma de flujos de calor perpendiculares a las superficies (Q_n) para las $n=5$ superficies que componen el calorímetro y el flujo de calor que atraviesa el material bajo ensayo Q_{mat} .

En consecuencia y suponiendo condiciones de estado estable para el calorímetro y flujos de calor unidireccionales (perpendiculares a las superficies del calorímetro) es decir se supone despreciable el efecto bidimensional del flujo de calor en los bordes y esquinas del calorímetro, se tiene el siguiente balance de energía:

$$P_{Lamp} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_{mat} \quad [1]$$

Donde, la potencia eléctrica puede estimarse mediante el producto del voltaje y la corriente.

$$P_{amp} = V * I \quad [2]$$

Los calores disipados a través de cada superficie y material en prueba, pueden ser calculados a su vez mediante el uso del coeficiente global de transferencia de calor, el área perpendicular al flujo de calor y la diferencia de temperaturas entre el aire interior y exterior del calorímetro. Como la diferencia de temperatura utilizada en el cálculo involucra la temperatura del aire interior y exterior, el coeficiente U en cada pared debe considerar la resistencia térmica por conducción convección y radiación en cada superficie. Lo anterior puede expresarse mediante la ecuación 3:

$$P_{Lamp} = A_1 U_1 (T_{ai} - T_{ae}) + A_2 U_2 (T_{ai} - T_{ae}) + A_3 U_3 (T_{ai} - T_{ae}) + A_4 U_4 (T_{ai} - T_{ae}) + A_5 U_5 (T_{ai} - T_{ae}) + Q_{mat} \quad [3]$$

Donde:

A_n : Área superficial de las $n=5$ superficies que componen el calorímetro.

U_n : Coeficiente global de transferencia de calor de las $n = 5$ superficies que componen el calorímetro.

T_{ai} : Temperatura del aire interior del calorímetro.

T_{ea} : Temperatura del aire exterior del calorímetro.

El flujo de calor Q_{mat} puede ser evaluado mediante la ecuación tradicional de conducción en una placa plana en régimen estacionario y flujo de calor unidireccional. Se supone en consecuencia que la conductividad térmica no varía con la dirección del flujo de calor.

$$Q_{mat} = K_m A_{mat} ((T_{pi} - T_{pe}) / L_{mat}) \quad [4]$$

Donde:

A_{mat} : Es el área perpendicular al flujo de calor que atraviesa el material bajo ensayo.

T_{pi} : Temperatura superficial interior del material bajo ensayo.

T_{pe} : Temperatura superficial exterior del material bajo ensayo.

K_m : Conductividad térmica del material bajo ensayo.

L_{mat} : Espesor del material bajo ensayo.

En la ecuación 4 aparece finalmente la salida esperada del modelo matemático propuesto K_m . Las demás variables pueden ser estimadas mediante su medición directa como se detallará mas adelante.

Como se tiene una superficie plana y el flujo de calor es unidireccional en estado estable, del balance térmico sobre la placa del material bajo ensayo, se tiene que el flujo de calor puede ser expresado en términos de los flujos de calor por convección y radiación sobre las superficies interior y exterior del material bajo ensayo, mediante las siguientes ecuaciones:

$$Q_{mat} = h_{cri} A_{mat} (T_{ai} - T_{pi}) \quad [5]$$

$$Q_{mat} = h_{cre} A_{mat} (T_{pe} - T_{ae}) \quad [6]$$

Donde:

h_{cri} : Coeficiente combinado de flujo de calor por convección y radiación sobre la superficie interior del material bajo ensayo.

h_{cre} : Coeficiente combinado de flujo de calor por convección y radiación sobre la superficie exterior del material bajo ensayo.

Si se supone que el coeficiente global de transferencia de calor es igual para las n superficies del calorímetro, por lo tanto se puede calcular considerando las resistencias térmicas por conducción convección y radiación como:

$$U_1 = U_2 = U_3 = U_4 = U_5 = \frac{1}{((1/h_{cri}) + (L_{ais}/K_{ais}) + (1/h_{cre}))} \quad [7]$$

Los valores h_{cri} y h_{cre} y el valor estimado de la conductividad del material K_m , se obtienen como resultados ó salidas del modelo matemático propuesto en las ecuaciones 1 a 7, mediante su resolución simultanea, usando el software EES (Engineer Equation Solver) y la medición directa de las siguientes variables o entradas del modelo matemático:

$$V, I, T_{ai}, T_{ae}, T_{pi}, T_{pe}, A_n, A_m, L_m.$$

4. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

En cualquier tipo de ensayo de carácter experimental, la importancia del análisis de incertidumbre radica en que permite asegurar a los usuarios de los resultados experimentales (en este caso fabricantes, diseñadores y usuarios de sistemas HVAC/R), cierto grado de confianza y credibilidad sobre los valores reportados como resultado de las pruebas. El procedimiento general para el cálculo de incertidumbre utilizado en este análisis, se encuentra consignado en las referencias [1,2,3,4].

Como se requiere medir la potencia consumida por la lámpara en el interior del calorímetro, se utiliza para esto un voltímetro de exactitud $\pm 1,2\%$ de la cantidad medida, un amperímetro de exactitud $\pm 2\%$ de la cantidad medida. Se deben medir adicionalmente la temperatura del aire interior y exterior del calorímetro y superficial interior y exterior del material en prueba, en estas mediciones se utiliza un termómetro digital de exactitud $\pm 1K$ y un termómetro infrarrojo de exactitud $\pm 2\%$ de la cantidad medida. Para la medición del área superficial y espesor del material se utiliza una cinta métrica de exactitud estimada $\pm 1mm$ y un calibrador de exactitud $\pm 0,5 mm$ respectivamente. Estas mediciones permiten alimentar el modelo matemático simplificado generado a partir del balance térmico.

El método básico para evaluar y expresar la incertidumbre en el resultado de una medición es universal, es decir, aplicable a todo tipo de medición y a todo tipo de datos de entrada. Sin embargo, en el caso particular de experimentación a nivel de ingeniería, evaluar y/o expresar la incertidumbre de medida es un proceso complejo, considerando que las magnitudes de salida son por lo general función de muchas otras variables independientes, medidas directamente durante el proceso, ensayo experimental o estudio de caso. Se requiere en este tipo de aplicaciones, de la experiencia del investigador en cuanto a los detalles del proceso para evitar, detectar y sobre todo estimar de manera objetiva, las diferentes contribuciones a la incertidumbre en la

magnitud de salida requerida, y de esta forma establecer entre otras, conclusiones fiables de las pruebas o ensayos realizados, con el fin de mejorar un determinado diseño, producto o servicio [5,6,7,8].

Dentro de las medidas implementadas en el diseño experimental del ensayo para reducir al máximo las fuentes de incertidumbre al estimar la conductividad térmica K_m por el método propuesto en este artículo se tiene:

- Las paredes del calorímetro se recubren de lámina de aluminio de baja emisividad para reducir significativamente el efecto de la radiación térmica sobre el balance de energía del calorímetro.
- El espesor de aislamiento es de 10 cm con el objetivo de reducir al máximo el efecto del medio ambiente exterior sobre el balance térmico y los resultados del modelo.
- El sensor de temperatura del aire interior se protege con una pantalla contra la radiación proveniente de superficies calientes cercanas a su zona sensible. En esta medición, el efecto de la temperatura corporal de las personas u otros cuerpos a diferente temperatura pueden afectar la medición. Par evitar este efecto, la zona sensible del sensor se ubica en el centro de un cilindro hueco elaborado en laminilla de papel aluminio de baja emisividad [9,10]. Ver figura 5.
- El sensor de temperatura del aire interior, se protege también con una pantalla contra la radiación de la lámpara y paredes interiores del calorímetro. El sensor atraviesa la placa de aislamiento del techo y se ubica su zona sensible muy cerca de la superficie interior del techo del calorímetro. Como pantalla de radiación se utiliza en este caso, perfil rectangular de aluminio como se muestra en la figura 6 y 7.



Figura 5. Pantalla de radiación para sensor de temperatura exterior.



Figura 6. Pantalla de radiación para sensor de temperatura Interior.



Figura 7. Pantalla de radiación para sensor de temperatura Interior.

- La medición de temperatura superficial interior se efectúa mediante una termocupla de contacto como se indica en la referencia [6]. Ver figura 8. El objetivo principal es reducir al máximo el efecto de la resistencia térmica de contacto del aire entre la superficie y el sensor [11,12,13].

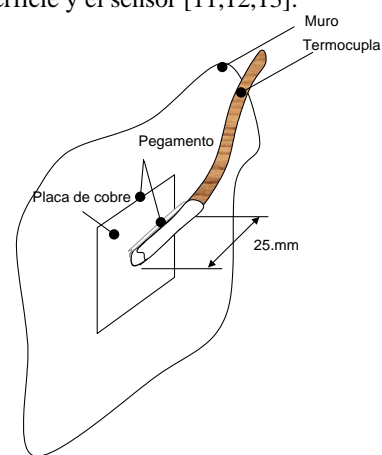


Figura 8. Sistema de medición de la temperatura superficial en una superficie plana.

- Se debe sellar de la mejor forma posible las uniones entre el material bajo ensayo y el calorímetro para evitar la filtración de aire exterior y su efecto neto sobre el balance de energía, considerando que este parámetro no se considera dentro del modelo, representaría una fuente importante de incertidumbre.

El análisis de incertidumbre sobre las mediciones implementadas en la prueba, atendiendo las anteriores recomendaciones, se efectúa siguiendo la metodología propuesta en las referencias [1,2,3,4]. Se tiene por lo tanto que la incertidumbre expandida U_{K_m} en el resultado del ensayo se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$U_{K_m} = u_{K_m} * k_{K_m} \quad [8]$$

Donde:

u_{K_m} : Incertidumbre combinada del mesurando K_m .

k_{km} : Factor de cobertura, puede variar entre 1 y 3 dependiendo del nivel de confianza y grados efectivos de libertad.

Para cualquier nivel de confianza, el valor real de la conductividad térmica del material bajo ensayo estimado experimentalmente K_m , estará por lo tanto entre $\overline{K_m} - U$ y $\overline{K_m} + U$. Donde $\overline{K_m}$ representa el valor promedio de los resultados del ensayo, para cada conjunto de mediciones o entradas del modelo.

El factor de cobertura k_{km} se calculará a partir de los grados efectivos de libertad. Considerando un nivel de confianza de 95,45%, lo cual concuerda con los reportes de incertidumbre de la instrumentación disponible y significa que el 95,45% de los datos estará como máximo $\pm 2\sigma$ alejado del valor medio.

Para obtener la incertidumbre combinada en la estimación de la conductividad del material bajo ensayo u_{km} , se requiere a su vez la incertidumbre combinada de cada medición efectuada durante el ensayo del material. Esta información permite aplicar finalmente el método de propagación de incertidumbre descrito en las referencias [1,2,3,4].

Los resultados del análisis de incertidumbre para el calorímetro e instrumentación utilizados, se presentan a continuación.

U_V : 0.158 V. Incertidumbre expandida en la medición del voltaje.

U_I : 0,023 A. Incertidumbre expandida en la medición del corriente.

U_A : $3.46 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$. Incertidumbre expandida en la medición de las áreas superficiales.

U_{Lm} : $1.76 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$. Incertidumbre expandida en la medición del espesor del material en prueba.

U_{Tpi} : 0.57 K. Incertidumbre expandida en la medición de la temperatura superficial interior.

U_{Tpe} : 0.38 K. Incertidumbre expandida en la medición de la temperatura superficial exterior.

U_{Tai} : 0.28 K. Incertidumbre expandida en la medición de la temperatura del aire interior.

U_{Tae} : 0.28 K. Incertidumbre expandida en la medición de la temperatura del aire exterior.

El valor calculado de los grados efectivos de libertad es $V_{fkm}=37,1$ por lo tanto se obtiene como resultado un valor del factor de cobertura de $k_{km} = 2,08$.

Los resultados del análisis indican que la incertidumbre combinada en el cálculo de la conductividad térmica del material bajo ensayo, para el sistema de medición es:

$$u_{km} = 0,01868 \text{ W/mK}$$

Aplicando la ecuación [8], se obtiene finalmente que la incertidumbre expandida en la estimación de la conductividad del material bajo ensayo es:

$$U_{km} = 0,038 \text{ W/mK}$$

Al analizar el peso relativo de cada medición sobre el resultado total, los resultados indican que las variables que más afectan la incertidumbre total del ensayo son la medición de la corriente, espesor del material y temperatura superficial interior del material bajo ensayo, con 38%, 9% y 16% respectivamente de la incertidumbre total. En este caso se utilizaron instrumentos de baja exactitud que no representan un costo significativo considerando que se trata de ensayos con fines de docencia, sin embargo al hacer un análisis de sensibilidad se encuentra que se podría reducir ampliamente la incertidumbre total del ensayo, si se implementan instrumentos de mayor exactitud en la medición de la corriente y espesor del material, sin generar un aumento significativo en el costo de la instrumentación utilizada y por ende de la prueba.

4. RESULTADOS DE LAS MEDICIONES

El objetivo general del diseño de la prueba y los ensayos a realizar es obtener mediante un método simple y relativamente confiable, la conductividad térmica de materiales elaborados en el país de los cuales se desconoce este valor ó materiales importados en los cuales se busca comparar los valores experimentales con los reportados por los fabricantes en el extranjero, y fijar en ambos casos criterios que permitan incorporar esta información de importancia para quienes diseñan y calculan sistemas HVAC/R en el país.

La metodología propuesta en este trabajo se aplica, a manera de ejemplo a resultados obtenidos a nivel de docencia en la práctica de laboratorio del curso de Transferencia de calor, para obtener la conductividad térmica de una lámina de material Y-plaK (Yeso laminado), este material básicamente consiste en yeso en polvo calcinado al que se le añade agua y aditivos con lo que se tiene una pasta que fraguará en pocos minutos. Por medio de la maquinaria especializada, esta pasta de yeso se introduce de forma automática y en un proceso continuo, entre dos laminas de cartón, con lo cual se obtiene la placa de yeso laminado. A continuación esta placa se corta a la medida adecuada, se seca en un horno y se paletiza, terminado así el proceso de fabricación.

Este material se utiliza en la actualidad ampliamente en Colombia para elaboración de muros livianos en edificios, entre otras razones por ser resistente a la deformación, incombustible, químicamente neutro y libre de sustancias nocivas; por tanto un material de construcción inocuo, fácil de trabajar y aplicar.

Para el ejemplo propuesto, se efectúa el montaje del material de prueba y sistemas de medición siguiendo las recomendaciones previamente descritas. Luego de un periodo de estabilización en las condiciones del ensayo de 2 horas, se obtuvieron los siguientes resultados en mediciones efectuadas a intervalos de 5 minutos.

Tabla 1. Resultados de las mediciones a intervalos de 5 minutos.

V [V]	I [A]	T ai [°C]	T ae [°C]	Tpi [°C]	Tpe [°C]
68,4	0,3	42	25	44	31,6
68,1	0,3	43	25	45	31,6
69	0,3	43	26	45	31,8
68,1	0,3	43	26	45	32
67,2	0,3	44	25	45	32
68,2	0,3	44	25	46	32,2

Las áreas medidas en cada superficie y el espesor del material bajo ensayo son:

$$\begin{aligned} A_1 &= 0,0117 \text{ m}^2 \\ A_2 &= 0,0117 \text{ m}^2 \\ A_3 &= 0,012 \text{ m}^2 \\ A_4 &= 0,012 \text{ m}^2 \\ A_5 &= 0,089 \text{ m}^2 \\ A_m &= 0,089 \text{ m}^2 \\ L_m &= 0,0125 \text{ m} \end{aligned}$$

Para estos datos, aplicando el modelo descrito previamente, se obtiene un valor estimado de la conductividad termica del Y-Plak de:

$$K_m = 0,37 \pm 0,038 \text{ W/mK}$$

La incertidumbre en este caso es del orden del $\pm 10,5\%$ del valor registrado experimentalmente mediante el método simplificado propuesto.

Es importante resaltar que el valor reportado de conductividad para este material en Europa por el fabricante *Knaufdrywall* (quien reporta y evidencia cumplir con rigurosidad las normas internacionales) es de $0,25 \text{ W/mK}$. Se detecta por lo tanto una diferencia importante entre el valor experimental y el reportado que puede deberse en principio a las simplificaciones del modelo pero sobretudo a posibles diferencias en los materiales y procesos de fabricación de las laminas importadas en el mercado Colombiano.

8. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en el diseño experimental presentado en este trabajo, se generó un método simplificado y relativamente confiable para obtener el valor estimado de la conductividad térmica de materiales de uso frecuente en Colombia.

Para el ejemplo de cálculo propuesto en este trabajo, se obtuvo una incertidumbre del orden del $10,5\%$ del resultado de la medición. Sin embargo se encontró que si se implementan instrumentos de mayor exactitud en sólo algunas mediciones, se podría reducir ampliamente la incertidumbre total del ensayo, sin generar un aumento significativo en el costo de la instrumentación utilizada y por ende de la prueba.

Los resultados indican que existen diferencias en los valores de conductividad térmica reportados por los fabricantes para el ejemplo estudiado, que pueden deberse en principio a diferencias en los materiales y proceso de fabricación de las laminas importadas en el mercado Colombiano.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ICONTEC, Norma Nacional GTC 51. Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones. Bogota, Colombia, 1997.
- [2] OROZCO Carlos, FONSECA Néstor. Análisis experimental de datos en ingeniería con estudios de caso. Revista Scientia et Técnica No 32, 2006.
- [3] ASHRAE. Engineering Analysis of Experimental Data, ASHRAE Guideline, ASHRAE. Atlanta USA, 1986.
- [4] FISSORE, A. Cálculo de error en las mediciones, análisis crítico y nuevas proposiciones, XVI Jornadas de transferencia de Calor y Materia Congreso. Universidad de Chile, Santiago, Chile, 1999.
- [5] HOLMAN, J.P. Experimental methods for engineers, McGraw-Hill, New York, N. Y, 1985.
- [6] FONSECA, Néstor. Estudio experimental del balance térmico de una ventana, Tesis de Maestría, Universidad de Concepción Chile, 2002.
- [7] Ernest O. Doebelin. 1990. Measurement systems application and design, Mc.Graw Hill. Boston.
- [8] James W. Dally. 1984. Instrumentation Engineering measurement, Wiley, New York.
- [9] ASHRAE STANDARD 41.1-1986 (RA 91) Standard Method for temperature Measurement. Atlanta USA, 1991.
- [10] KINZIE P.A. Thermocouple temperature measurement, Wiley, New York, 1973.
- [11] HOWAR Lawrence. Error accumulation in thermocouple thermometry, The Boeing Company-Symposium on temperature, 5 th, Washington D.C, 1996.
- [12] KINZIE P.A. Thermocouple temperature measurement, Wiley, New York, 1973.
- [13] OMEGA. The temperature Handbook, VOL 28. 1992.